

感潮河川の河口密度流解析

徐承德 · 朴成培

慶北大學校 農科大學 農工學科

Analysis of Density Current in the Tidal River

Suh, Seung Duk · Park, Sung Bae

Dept. of Agricultural Engineering, Coll. of Agric., Kyungpook Natl. Univ.

Summary

The purpose of this study is to offer the basic data of the tidal river development program by grasping the diffusion between the high density—sea water and the low density—fresh water in the tidal river. The tidal range of Hyungsan river which flows at Youngil bay in Pohang was selected to analysis the phenomenon of density current.

The results obtained are as follows;

The tide of Youngil bay was one time a day, 0.104 m in high tide difference and 0.085 m in mean tide difference. The change of sea level by tide was negligible.

The volume of reserved water by sea water was 2,700,000 m³ and available water of irrigation was 1,200,000 m³ that salt density is below 750 μσ/cm out of total volume.

Salt intrusion phenomenon by density current was a little water level change, however, it became a salt wedge type by the much salt invasion during the spring tide and it makes a well-mixed type by the retreating salt wedge during the neap tide.

As long as there were some density differences between sea water and fresh water, net upstream flow was existed along the bottom of water way from the estuary to the upstream channel.

緒 論

우리나라는 農業用水, 生活用水 및 工業用水等 水資源의 급격한 需要上昇과 더불어 氣候의 偏奇現象에 의하여 豊水早魃의 奇現象을 낳고 있다. 이러한 現實的 難關을 克服하기 위하여 오늘날의 用水開發은 댐이나 貯水池 및 地下水의 開發利用에 이어 感潮河川區間에서 河川水를 利用하는 데까지 이르렀다. 이와 같이 河川感潮區間에 대한 利用度가 높아짐에 따라 感潮區域에서의 水位, 流量 및 海水浸透 등에

대한 많은 研究가 이루어 졌다. 그러나 우리나라의 경우 時間에 따라 水位와 流量의 變化가 심한 西海岸 地域에서는 不定流 解析을 利用한 많은 研究가 이루어 졌으나 東海岸과 같이 潮汐의 變化가 작은 대신 河口部에 항상 一定水位의 潮水가 밀려 들어오고 있는 現象에 대한 研究가 거의 없는 實情이다.

本 연구에서는 干滿差가 10 cm 内外인 浦項 迎日灣으로 流出하고 있는 兎山江을 對象으로하여 潮汐干滿의 差가 작은 感潮河川에서 密度가 작은 淡水가 密度가 큰 海水와 接觸때 淡水가 어떻게 混合擴散

하는 가를 把握하여 海水의 浸透分布를 豫測하여 用水源開發 및 河川管理의 基本資料를 提供하고자 本 調査研究를 遂行하였다.

材料 및 方法

1. 材料

1) 對象河川의 概況

兄山江은 太白山脈의 동쪽에 位置한 우리나라 10 大河川의 하나로써 流域面積은 1,166.8 km²이고 流路延長이 62.2 km이며 이 중 直轄河川區間은 慶北 迎日郡 延日面과 月城郡 江東面의 境界로부터 慶北 浦項市 松島洞의 海岸線까지 約 10.5 km이고 地方 河川區間은 慶北 慶州市 西峴洞 大川 合流點으로부터 直轄河川區間까지 約 26.5 km에 達하며 나머지 區間은 準用河川區間에 속한다.^{8,12)}

本 研究에서 사용한 河川區間은 Fig. 1과 같이 兄山江 河口地點으로부터 江東Ⅱ橋地點까지의 13.1 km에 達하는 感潮區間으로 하였다.

2) 氣象觀測資料

流域內에 位置한 浦項測候所에서 1954년부터 1977 年까지의 24 年에 걸쳐 觀測한 氣象資料를 사용한 바 Table. 1과 같다.

3) 流量觀測資料

兄山江 流域의 水文基準點인 建設部管理 扶助 水位觀測所에서 1963 年 및 1975~1977 年에 걸쳐

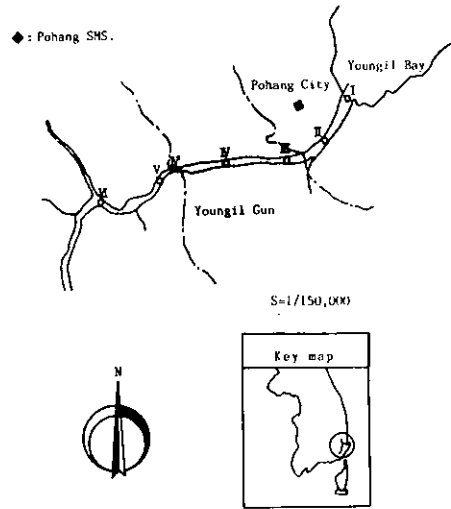


Fig. 1. River reaches in Hyungsan Main River.

實測한 資料를 使用하였다.

4) 流出量

扶助 水文基準點에 대하여 最近 10年(1968~1977)에 걸쳐 觀測한 水位實測資料에 의해 月別 流出量을 算定한 結果는 Table 3. 과 같다.

2. 分析方法

潮汐干滿의 差가 작은 感潮河川에 대한 鹽分침입의 分析은 實測資料를 根據로 하고 河口部의 流路 바다 傾斜는 매우 緩慢하므로 鹽分의 侵入領域 전체

Table 1. Meteorological data (1954 - 1977)

Month	Term	Atmosphere (mb)	Temperature (°C)			Humidity (%)	Precipitation (mm)	Evaporation (mm)
			Average	Highest	Least			
1		1,021.8	0.5	16.3	-14.4	53.50	35.4	88.80
2		1,021.3	2.5	20.4	-13.4	56.80	43.0	83.60
3		1,019.0	6.5	25.0	- 9.9	60.20	60.1	116.10
4		1,016.2	12.2	30.4	- 2.3	65.70	92.8	143.30
5		1,011.6	17.2	35.1	4.4	68.00	70.3	186.90
6		1,008.4	20.2	37.3	8.2	76.20	118.5	175.30
7		1,007.0	24.3	37.9	13.6	77.70	189.9	169.70
8		1,008.5	25.2	37.9	14.7	76.50	157.0	174.60
9		1,013.1	20.8	33.9	9.8	77.70	157.0	127.50
10		1,019.1	15.4	28.1	1.2	69.60	79.7	119.00
11		1,021.9	9.4	23.4	- 8.3	64.10	61.1	96.30
12		1,022.3	3.3	18.9	-12.9	56.80	30.8	88.00
Mean (Total)		1,015.9	13.1	37.9	-14.4	65.70	1,107.5	1,490.00

Table 2. Rating table at Bujo

Height (m)	Width (m)	Cross sectional area (m ²)	Mean velocity (m/sec)	Discharge (m ³ /sec)	Measurement
1.11	29	15.92	0.150	2.40	Current meter
1.11	-	11.30	0.224	2.53	"
1.50	54	51.00	0.141	7.21	"
1.55	68	42.43	0.203	8.65	"
1.40	37	32.43	0.382	12.42	"
1.40	-	37.05	0.253	9.41	"
1.39	23	28.44	0.276	7.88	"
1.35	23	27.24	0.283	7.71	"
1.35	69	41.94	0.231	9.70	"
1.50	72	49.76	0.293	14.58	"
1.20	63	33.92	0.239	8.14	"
2.10	99	107.12	0.320	34.36	"
1.58	112	119.11	0.070	14.03	"
1.50	112	113.92	0.109	12.49	"
1.48	112	113.28	0.101	11.48	"
1.45	112	110.16	0.094	10.37	"
1.40	112	104.96	0.090	9.49	"
1.35	112	99.76	0.086	8.90	"
2.50	177	414.04	0.202	497.53	Surface float
2.10	175	231.10	0.873	202.72	"
2.20	176	278.90	0.954	266.12	"
0.85	31	4.01	0.169	0.69	Current meter
0.85	31	4.00	0.167	0.68	"
1.50	-	-	0.433	9.74	"

Table 3. Discharge at Bujo

Term	Discharge			
	Average (m ³ /sec)	Total (10 ³ m ³)	Minimum (10 ³ m ³)	Maximum (10 ³ m ³)
Month 1	11.225	30,065	2,009	84,370
2	9.630	23,297	1,935	59,270
3	12.730	34,096	8,035	73,656
4	20.200	52,358	12,442	119,232
5	21.895	58,644	4,152	111,154
6	16.065	41,640	4,018	155,520
7	76.700	205,433	9,374	857,088
8	49.510	132,608	8,303	342,835
9	61.200	158,630	37,584	673,920
10	19.860	53,193	25,713	101,779
11	16.780	43,494	13,478	71,280
12	9.960	26,677	8,303	61,603
Total	325.755	860,135	290,092	1,815,558

에 걸쳐 수심 h가 一定하다고 取扱하였으며 Harleman⁴⁾의 理論을 導入하여 密度流現象을 解析하였다.

河口는 密度가 다른 淡水와 海水가 混合하는 點이며 河口部の 鹽分分布는 混合形態에 따라 計算法

이 달라지는데 淡水와 海水의 混合樣式은 弱混合型 (Negligible Mixing), 緩混合型 (Moderate Mixing), 强混合型 (Strong Mixing)의 세가지로 分類된다.^{2,11)}

本論文의 對象河川인 兪山江은 平均潮差가 0.085 m, 平水位時의 水面幅이 250 m, 水深 4 m의 河口條件을 갖는 感潮河川으로서 비교적 느린 流速으로 迎日灣으로 流下한다. 따라서 本河川은 弱混合型의 成層密度流를 形成하고 있다고 評價하였다.

Fig. 2는 일반적인 鹽水楔기의 형태로서 이에 대한 計算은 不等流의 運動方程式을 導入한 Schijf-Schönfeld¹⁰⁾의 公式을 利用하였다.

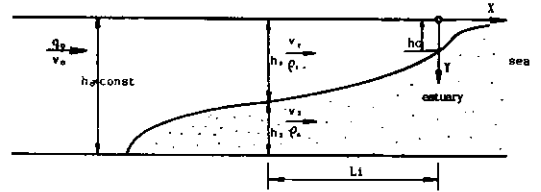


Fig. 2. Standard salt wedge.

流水의 未攪저항손실을 If 라 할때 運動方程式은

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = i - \frac{\partial h}{\partial x} - If \dots \dots \dots (1)$$

이다. 따라서 상층 및 하층의 흐름에 대한 運動方程式은

$$\text{上層流: } \frac{1}{g} \frac{\partial v_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) = i - \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} \right) - If \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{下層流: } \frac{1}{g} \frac{\partial v_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = i - (1 - \epsilon) \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial h_2}{\partial x} - If \dots \dots \dots (3)$$

이다.^{3,6)} (단 $\epsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho}$)

(2)式과 (3)式으로부터 誘導된 内部境界面의 型 및 楔기의 길이 L은 다음의 式으로 주어진다.

$$y = \frac{1}{2} y^2 - \frac{1}{4 Fi_1^3} y^4 + \frac{1}{5 Fi_1^3} y^5 - \frac{3}{4} Fi_1^3 + \frac{3}{10} Fi_1^4 \dots \dots \dots (4)$$

$$L = \frac{2h_0}{fi} \left[\frac{1}{5 Fi_1^3} - 2 + 3 Fi_1^3 - \frac{6}{5} Fi_1^3 \right] \dots \dots \dots (5)$$

$$y = \frac{h_1}{h_0}$$

Fi₀ : 내부 Froude 수 ($Fi_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\epsilon \cdot g \cdot h_0}}$)

fi : 마찰손실계수 [金子⁹⁾의 실험식 $fi = 0.8 \left(\frac{v_1^3}{v \cdot \epsilon \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}}$

을 이용하였다.) (Fig. 3 Velocity distribution of salt wedge 참조)

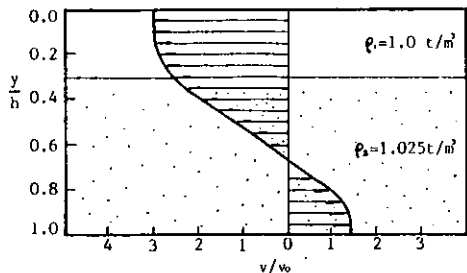


Fig.3. Velocity distribution of salt wedge.

Fig. 3은 $x = -2.3 \text{ km}$ 地點에 대한 流速分布를 나타낸 것이다.

同地點에 대한 實測값은 $V_1 = 0.43 \text{ m/sec}$ ($V_0 = 0.17 \text{ m/sec}$) 動粘性係數 $\nu = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이므로 鹽水峯의 길이 L 은 다음과 같이 구해진다.

$$L = \frac{2h}{fi} \left(\frac{1}{5Fi_0^2} - 2 + 3Fi_0 - \frac{6}{5}Fi_0^3 \right) = 5,920 \text{ m}$$

$$fi = 0.8 \left(\frac{v_1^3}{v \cdot \epsilon \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}} = 3.98 \times 10^{-3}$$

$$Fi_0 = \frac{q_0^2}{\epsilon \cdot g \cdot h} = 0.039$$

結果 및 考察

1. 水位—流量曲線

Fig. 4는 扶助 水文基準點의 流量實測資料를 土臺로 하여 作圖한 流量曲線圖로서 最小自乘法를 利用

하여 $Q = 1.312h^{6.025}$ 의 關係式을 遊導하였다. 이는 相關係數 $r = 0.98$ 로써 高度의 有意性이 있으며 大體로 梯型의 河川形態를 이루고 있다. (Fig. 4 Rating curve at Bujo 참조)

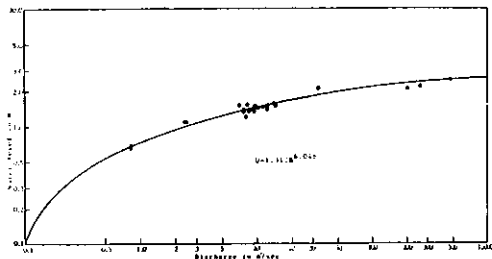


Fig. 4. Rating curve at Bujo.

2. 流況

Table 4.는 扶助 水文基準點의 流量實測記錄을 土臺로 流況을 算定한 結果이다.

Table 4. Flow at each water level

Item	Term	Waterlevel (m)	Discharge (m ³ /sec)
Drought water		1.11	4.28
Low water		1.34	8.16
Ordinary water		1.67	26.10
Flood water		4.32	813.53
Design flood water		7.35	2,600.00

3. 河口의 海象

1968년부터 1979년까지 12년간에 걸쳐 建設部에서 觀測한 潮位觀測資料를 土臺로 算定한 兪山江河口에서의 潮位現況은 다음과 같다.^{7,8)}

Table 5. Salinity distribution in tidal range (spring tide)

Specific depth (y/h ₀)	Station 1 (1,200 m)		Station 2 (1,700 m)		Station 3 (2,300 m)		Station 4 (3,000 m)		Station 5 (4,000 m)		Station 6 (4,400 m)	
	Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm		Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm		Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm		Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm		Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm		Salinity S/S ₀ × 10 ³ μ Ψ/cm	
0.1	7.2	0.17	4.9	0.11	2.8	0.07	1.1	0.03	0.32	0.01	0.30	0.006
0.2	8.5	0.20	5.3	0.12	3.4	0.08						
0.3	13.5	0.33	8.4	0.20	5.7	0.13	2.0	0.05	0.7	0.02	0.30	0.006
0.4	23.8	0.65	18.5	0.48	15.3	0.38						
0.5							14.0	0.34	6.5	0.15	0.30	0.006
0.6	29.0	0.85	27.5	0.80	25.5	0.72						
0.7							23.8	0.65	16.0	0.40	0.32	0.01
0.8	30.5	0.94	30.3	0.93	28.5	0.84						
0.9	31.0	0.96	31.0	0.96	29.2	0.86	26.5	0.75	21.0	0.55	0.32	0.01

Table 6. Salinity distribution in tidal range (neap tide)

(y/h ₀)	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀	Salinity S/S ₀		
0.1	14.5	0.36	11.5	0.28	10.2	0.25	5.8	0.13	3.2	0.07	0.30	0.006
0.2	14.7	0.37	12.0	0.29	10.2	0.25						
0.3							6.1	0.14	3.2	0.07	0.30	0.006
0.4	20.2	0.52	14.0	0.34	11.3	0.28						
0.5							8.6	0.21	4.8	0.11	0.30	0.006
0.6	25.6	0.72	22.0	0.59	18.0	0.47						
0.7							17.0	0.43	8.0	0.19	0.32	0.01
0.8	30.1	0.91	29.5	0.88	26.0	0.73						
0.9	30.7	0.96	30.4	0.95	27.0	0.77	21.0	0.55	12.5	0.30	0.32	0.01

- 大潮平均高潮位 (H.W.O.S.T) 0.188 m
- 小潮平均高潮位 (H.W.O.N.T) 0.169 m
- 平均海面 (M.S.L) 0.136 m
- 小潮平均干潮位 (L.W.O.N.T) 0.103 m
- 大潮平均干潮位 (L.W.O.S.T) 0.084 m
- 基本水準面 (B.M) 0.000 m

4. 河口密度流

밀도가 작은 담수가 밀도가 큰 해수와 혼합되는 과정에는 여러가지 類形의 密度流가 形成되나 兎山江과 같이 潮汐干滿의 差가 작은 河口에 상당한 流速을 가진 流水가 流入하는 경우에는 成層密度流가 이루어진다.

Table 5.와 Table 6.은 대체로 平水位를 維持하는 4月 및 10月初에 兎山江 感潮區間에서 conductivity meter로 實測하며 平均한 滿潮와 干潮時의 鹽分分布資料이다. [S₀는 迎日灣의 純粹한 海水 鹽分濃度로서 測定溫度 18℃일때 S₀=32,000 μU/cm (=20,480 ppm)이다]

Fig. 5와 Fig. 6은 感潮區域內에서 滿潮와 干潮時의 比水深에 대한 比鹽度分布를 나타낸 것이다.

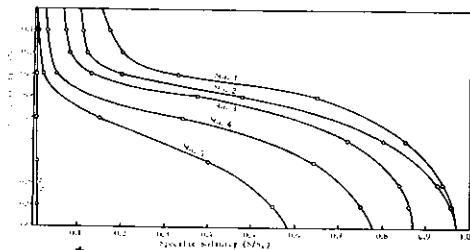


Fig. 5. Salinity distribution in tidal range (spring tide)

實測에 따르면 本 河川은 滿潮時에는 뚜렷한 境界面이 形成되는 特性을 나타내어 成層密度流가 이루어지는 반면 干潮時에는 鹽水楔기가 後退하면서 楔

기先端의 鹽分이 淡水와 混合擴散되며 流下하여 境界面이 不分明해지는 잘 混合된 河口를 形成한다.

Fig. 7은 鹽水楔기形과 잘 混合된 河口形에 대한 感潮區域內의 鹽分浸透圖이다.

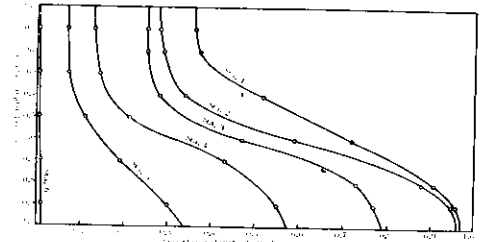


Fig. 6. Salinity distribution in tidal range (neap tide).

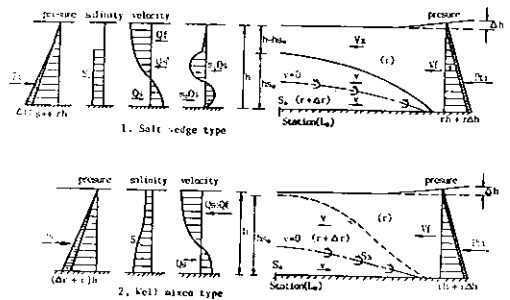


Fig. 7. Salt intrusion diagram in tidal range.

成層密度流에 대한 解析은 Harleman⁴⁾의 理論을 導入하였다. Harleman은 鹽水楔기의 作用을 進 weir의 作用과 比較하였다.

鹽水楔기 內의 흐름은 Fig. 7(1)과 같이 上流로 향해 移動하는 鹽水 Q_S가 바다로 향해 移動하는 流量 Q_{S'}와 평형을 이루고 있다. Q_S는 上流方向으로 갈수록 減少하며 鹽水의 수직이동은 流速이 零인 線을 통해 일어나는 것으로 解析된다.

密度差에 의해 上層部로 밀려 올라간 淡水의 流速

은 바다로 향하여 增加하고 最大流速은 河口部附近에 이룰때 發生한다. 이러한 흐름상태는 浸透의 끝地點에 대하여 Fig. 7에 표시한 바와 같이 力學的으로 靜水壓에 따른다. 즉 임의의 觀測地點 L_i에서 수심 h에 대한 壓力은 峽기內의 L₀ 지점에서 鹽度에 의해 增加된 壓力 (r_s - r) h_{so} = Δr · h_{so} 만큼 增加되며 이 壓力은 潮位를 Δh 만큼 上昇시키고 L_i地點에서의 靜水壓을 r · Δh 만큼 증가시킨다. ¹⁴⁾

이와 같이 河口內의 鹽分浸透는 量的으로 浸透길이에 沿한 鹽水와 淡水사이의 密度差에 의해 대규모의 循環形態가 存在하는 것으로 思料된다.

Fig. 8은 鹽水峽기가 明白해지는 滿潮時의 河口로부터 거리에 대한 鹽分分布圖이고, Fig. 9는 干潮時의 混 澁된 河口形態를 나타내는 鹽分分布圖

이다.

Fig. 10은 實測에 의한 鹽水峽기의 形狀으로 內部境界面의 型은 $y - \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{4Fi_0^2}y^4 + \frac{1}{5Fi_0^2}y^5 - \frac{3}{4}$

$Fi_0^2 + \frac{3}{10}Fi_0^2 = \frac{fi}{8} \cdot \frac{x}{h} \left(y = \frac{h_1}{h_0} \right)$ 의 式으로 주어

지며 峽기의 길이 L은 L = 5.9 km로 計算되었다.

그러나 實測에 따르면 4.4 km地點에서 S = 320 μQ/km로서 鹽分の 侵入이 거의 中斷된다. 이는 4.4 km地點에 있는 延日 潛水橋에 의해 河幅이 $\frac{1}{3}$ 정도로 縮小되며 淡水의 流速을 急增시켜 鹽分の 侵入을 阻害하는 것으로 思料된다. 그림에서 點線部分은 延日 潛水橋의 妨害가 없다고 假定한 때의 豫象鹽分分布圖이다.

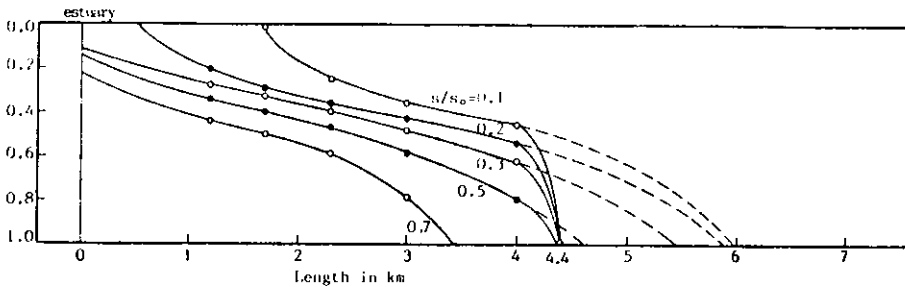


Fig. 8. Salinity distribution in tidal range (spring tide). 1

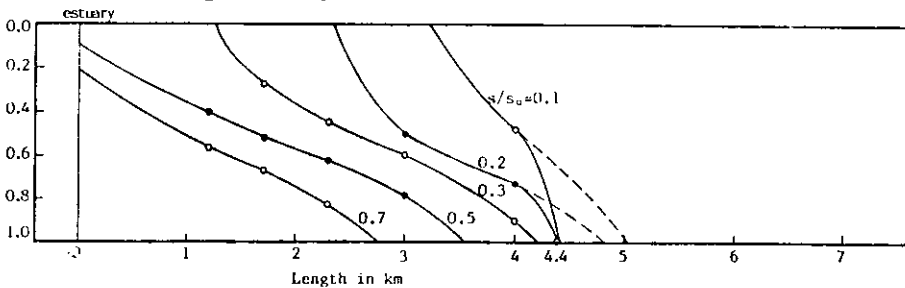


Fig. 9. Salinity distribution in tidal range (neap tide).

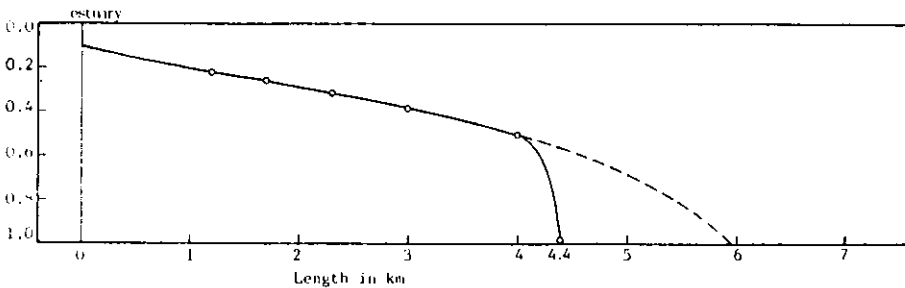


Fig. 10. The shape of salt wedge.

摘 要

平均潮差가 10 cm内外인 浦項 迎日灣으로 流入하는 兄山江의 感潮區間을 採擇하여 流域內的 扶助 水文基準點에서 觀測한 資料와 河川流量 및 水質測定 資料 등을 根據로 密度流現象을 分析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 迎日灣의 潮汐現象은 1日1回潮이며 大潮差 0.104 m, 小潮差 0.066 m, 平均潮差 0.085 m로써 海面의 變動은 매우 작았다.
2. 感潮區間內에는 海水의 影響으로 因하여 約 270 萬 m³ 以上の 물이 貯溜되고 있으며 이중에서 鹽分濃度가 750 $\mu\text{U}/\text{cm}$ 以下로써 灌溉用水로 利用 가

능한 水量은 約 120 萬톤에 達하고 있다.

3. 海水浸透現象은 干滿의 差에 의한 水位變化는 작으나 滿潮時 鹽分侵入이 卓越하여 뚜렷한 層이 形成되는 成層密度流가 되고 干潮時에는 鹽水쇄기가 後退하면서 쇄기 上流端의 鹽分이 淡水와 混合 擴散되면서 流下하여 잘 混合된 河口를 形成한다.

4. 鹽水쇄기의 長이는 5.9 km로 計算되었으나 실제로는 4.4 km地點에 設置된 延日 潛水橋의 影響으로 因하여 同地點에서 $S = 320 \mu\text{U}/\text{cm}$ 로서 鹽分의 浸透가 中斷된다.

5. 淡水와 海水사이에 어떠한 크기의 密度差가 存在하는 限 水路바닥을 따라 흐르는 純上流 方向의 흐름이 存在한다.

引 用 文 獻

1. 農業振興公社, 1983, 淡水湖化混合過程: pp.193-214.
2. 崔榮博, 1973, 海岸 및 港灣工學, 文運堂: pp. 119-129.
3. 崔榮博, 1981, 水理學, 光林社: pp.392-415.
4. Harleman, D. R. F. et al, 1959, The diffusion of two fluid of different density in a homogeneous turbulent field, Tech.Rep. No. 31.
5. Harleman, D. R. F., 1966, Estuary and coastline Hydrodynamics, Chap. 10, McGraw-Hill Book Co.,
6. 金熙鍾, 1972, 河川工學, 東明社: pp.176-185.
7. 林迎春, 1982, 千拓工學, 韓國農村環境開發研究所: pp.69-98.
8. 建設部, 1979, 兄山江 河川整備基本計劃.
9. 濱田德, 1950, 河口港としての石卷港の研究, 運輸省港灣局.
10. Schif, J. B. & Schönfeld, J. C., 1953, Theoretical consideration on the motion of salt and fresh water, Proc. of Minnesota Intern convention.
11. Stommel H., 1953, The role of density currents in estuaries, Pros. Minn. International Hydraulic convention.
12. 徐承德, 1966, 慶州 水文調査에 對하여, 韓國農工學會誌 8(2):79-83.